

УДК 574.58

ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭКОСИСТЕМЫ НЕВСКОЙ ГУБЫ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

К. А. Подгорный

ИБВВ им. И. Д. Папанина РАН, Борок, Россия, kap@ibiw.yaroslavl.ru

A TWO-DIMENSIONAL SIMULATION ECOSYSTEM MODEL OF THE NEVA BAY, GULF OF FINLAND

K. A. Podgornyj

*I. D. Papanin Institute for the Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences,
Borok, Russia, kap@ibiw.yaroslavl.ru*

Невская губа Финского залива – сложная водная экосистема, причем сложная и для проведения полевых экологических исследований, и для разработки математических моделей. Своеобразие Невской губы обусловлено целым рядом причин: (I) на формирование ее водной массы значительное влияние оказывает Ладожское озеро, воды которого со стоком Невы поступают в Невскую губу в объеме 2400–2500 м³/с; (II) кратность годового водообмена за счет притока речных вод равна 66, что обеспечивает обновление воды в ней в среднем за 5–6 суток, а в центральной транзитной зоне почти вдвое быстрее; (III) Невская губа – мелководный водоем с преобладающими глубинами 3–5 м, интенсивным ветровым перемешиванием водных масс, разнообразными внутриводоемными процессами биогидрохимической трансформации; (IV) велико влияние Балтийского моря, которое сказывается на изменении солености и температуры воды, изменениях уровня воды и структуры биологических сообществ; (V) Невская губа – район с высоким уровнем техногенной нагрузки на окружающую среду; (VI) на экосистему Невской губы оказывает влияние строящийся комплекс водозащитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений. Вследствие совместного действия перечисленных факторов Невской губе свойственна чрезвычайно высокая пространственно-временная изменчивость качества воды. К настоящему времени за более чем столетний период наблюдений накоплен огромный фактический материал данных наблюдений за состоянием экосистемы Невской губы. Имеется определенный опыт разработки математических моделей различного типа и назначения, создания интегрированной системы поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Цели работы состояли в том, чтобы: (I) на основе всестороннего системного анализа данных наблюдений и сведений, опубликованных в литературных источниках, разработать имитационную, пространственно-неоднородную модель экосистемы Невской губы; (II) путем численных экспериментов исследовать наиболее важные закономерности трансформации и круговорота соединений азота, фосфора и динамики растворенного в воде кислорода, количественно оценить процессы, определяющие продукционный потенциал Невской губы.

В имитационной модели экосистемы Невской губы выделены, разработаны и программно реализованы следующие основные ее блоки: (I) гидродинамический – для расчета нестационарной, осредненной по вертикали структуры течений в водоемах; (II) гидротермодинамический – для расчета фотопериода, составляющих теплового баланса и температурного режима водоема; (III) гидрооптический – для расчета оптических характеристик водной толщи; (IV) блок для описания процессов трансформации соединений азота и фосфора в водоеме и динамики растворенного в воде кислорода¹; (V) блок для расчета времени оборота и потоков вещества между выделенными (агрегированными) модельными компонентами экосистемы; (VI) блок для выполнения процедуры оценивания параметров имитационной модели. Все вычисления по модели проводятся только на основе стандартной метеорологической, гидрологической, гидрохимической и гидробиологической информации. В блоке (IV) имитационной модели рассматриваются 17 переменных состояния: концентрации растворенных фракций органического азота и фосфора, неорганического фосфора, аммонийного, нитритного, нитратного азота, азота и фосфора в составе детрита, концентрация растворенного в воде кислорода, биомассы гидробионтов (гетеротрофных бактерий, фитопланктона, простейших и зоопланктона) в единицах азота и фосфора. Задача моделирования динамики пространственно-неоднородной водной экосистемы решается в два основных этапа. Сначала на заданном шаге по времени проводится численное интегрирование системы уравнений термодинамики. В результате моделирования гидрологического комплекса определяются значения средних по глубине составляющих скорости течения, потоков коротковолновой солнечной радиации, величины фотопериода и средней по вертикали температуры воды. Затем на том же временном интервале интегрируется система уравнений турбулентной диффузии и трансформации веществ. Решение этой задачи позволяет найти значения концентраций биотических компонентов экосистемы к концу заданного шага по времени. Построение вычислительных алгоритмов основано на

¹ При разработке этого блока модели большая помощь оказана ведущим научным сотрудником Института океанологии РАН, д. х. н. А. В. Леоновым, которому автор приносит свою огромную благодарность.

применении различных вариантов схем расщепления уравнений по физическим процессам и пространственным координатам. Все алгоритмы и схемы численного интегрирования систем уравнений, методика расчета тепловых потоков на поверхности водоема при различных условиях стратификации приподнятого слоя воздуха, варианты расчета потока тепла на дне водоема, алгоритм процедуры оценивания параметров имитационной модели подробно рассмотрены в работах (Подгорный, 2000; 2003). Вычисления проводились на равномерной прямоугольной сетке размером 500x500 м. Временной шаг при численном интегрировании разностных уравнений для обеспечения устойчивости вычислений был выбран равным 30 секундам. Вычисления полей течений, температуры и биотических компонентов экосистемы начинались от момента очищения Невской губы ото льда и продолжались до 31 октября. Изменение гидрометеорологической ситуации над водоемом происходило каждые сутки модельного времени.

Моделирование проводилось для четырех лет наблюдений (с 1984 по 1987 годы). Результаты моделирования позволяют говорить о достаточно хорошем качественном и количественном соответствии модельных оценок и имеющихся данных наблюдений. В качестве показателя адекватности модели используется критерий Тила, значение которого может меняться от нуля до единицы, причем при полном совпадении модельных и наблюдаемых величин его значение равно нулю. Сравнение полей температуры показывает, что для них критерий Тила меняется в пределах от 0,0307 до 0,2093 при среднем значении 0,0781. Средние по биотическим компонентам величины этого критерия меняются от 0,2306 до 0,3778 при среднем значении 0,2812. Во взвешенном органическом веществе азот и фосфор в составе детрита составляют 45–75, 10–30 – азот и фосфор в составе фитопланктона и 10–20 – азот и фосфор в составе гетеротрофных бактерий. Роль зоопланктона в Невской губе невелика. Основной фракцией минерального азота является азот нитратов – 60–70. Азот нитритов составляет менее 5. Отношение менялось от 30 до 190, – от 16 до 40, – от 23 до 49, а их внутригодовая динамика качественно отличалась от года к году. С помощью модели оценены пределы изменчивости важнейших компонентов экосистемы: DIP – 2,02–20,08 мкг/л; DOP – 1,30–12,25 мкг/л; PD – 19,60–35,06 мкг/л; – 31,96–191,97 мкг/л; – 4,50–18,14 мкг/л; – 160,05–468,20 мкг/л; DON – 237,87–943,41 мкг/л; ND – 196,04–400,12 мкг/л.

Эти результаты также согласуются с данными многолетних наблюдений. С помощью модели и данных наблюдений показано, что содержание азота и фосфора в воде Невской губы, по всей видимости, не может быть лимитирующим фактором, сдерживающим увеличение биопродуктивности водоема. На это указывает несоответствие между сравнительно низким уровнем развития фитопланктона при достаточно высоких концентрациях биогенных элементов. Вклад первичной продукции фитопланктона в общее поступление органического вещества невелик. Результаты моделирования и данные наблюдений показывают, что основной причиной интенсивного развития гетеротрофных процессов в Невской губе являются величины аллохтонного органического вещества. Влияние комплекса защитных сооружений в целом невелико и прослеживается только на нескольких шагах расчетной сетки (в среднем до 5–10 шагов в зависимости от ветровых условий). Однако данный вопрос еще требует более детального исследования.